

# Metodología para la intervención en elementos históricos: el caso de la espadaña del convento de Nuestra Señora de la Consolación (Alcalá de Henares-Madrid-España)

*Methodology for intervention in historical elements: the case of the belfry of the convent of "Nuestra Señora de la Consolación", (Alcalá de Henares-Madrid-Spain)*

E. Martínez(\*), A. Castillo(\*\*), I. Martínez(\*\*), M. Castellote(\*\*)

## RESUMEN

El objeto del presente trabajo es el estudio de daños detectados en la espadaña del Convento de Nuestra Señora de la Consolación, Alcalá de Henares, así como el análisis de los materiales para establecer, tanto el estado actual de la estructura, como la naturaleza y grado de deterioro de los materiales originales. Para ello se aplicó una metodología de estudios previos en edificaciones históricas, en la que se utilizaron, entre otras técnicas, el análisis termográfico del elemento, para posteriormente proceder a la determinación experimental de las emisividades de los diferentes materiales inspeccionados. El uso de técnicas complementarias de caracterización y análisis como porosimetría de intrusión de mercurio, difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y termogravimetría, así como la caracterización mecánica de los materiales, ha permitido ahondar en las características del mortero de unión y las piezas de fábrica; evaluando completamente el estado actual y facilitando su rehabilitación.

464-9

**Palabras clave:** Metodología; construcciones históricas de fábrica; morteros; termografía infrarroja.

## SUMMARY

The purpose of this paper is the study of damage detected in the belfry of the convent of "Nuestra Señora de la Consolación", Alcalá de Henares, as well as the materials analysis to establish both the current state of the structure as the nature and extent of the deterioration of the original materials. For a good detection of defects in the structure were the application of a methodology of previous studies in historical buildings, in which were used, among other techniques, the element Thermographic Analysis, to then proceed to the experimental determination of the emissivities of the different inspected materials. The use of supplementary techniques of analysis as porosimetry of mercury, x-ray diffraction, electron microscopy of scanning and thermogravimetry, as well as mechanical characterization of materials, has made it possible to delve into the characteristics of the Union mortar and employed; evaluate comprehensively current degradation status and facilitating the rehabilitation.

**Keywords:** Methodology; historical constructions of masonry; mortars; infrared thermography.

(\*) ETSAM-Universidad Politécnica de Madrid, (España).

(\*\*) Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). Madrid, (España).

Persona de contacto/Corresponding author: enrimar@arquired.es (E. Martínez)

1. Plano original de la iglesia e imagen exterior de la fachada de 1940. Archivo Dirección General de Regiones Devastadas y Reparaciones (DGRDR).

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las intervenciones en edificios históricos (1) están intrínsecamente relacionadas con la fase de estudios previos sobre el mismo (2). El planteamiento de un buen proyecto de intervención deberá estar respaldado por un exhaustivo estudio y análisis de la edificación sobre la que vamos a actuar (3).

Por ello, se debe establecer una correlación directa entre los elementos que son objeto de análisis, el tipo de estudio que se debe realizar sobre cada uno de ellos y los posibles datos o conclusiones que se obtengan a partir de los mismos. El estudio en laboratorio y las actuales técnicas de análisis de los materiales, así como las aplicaciones termográficas, presentan nuevos avances para el conocimiento en profundidad del elemento objeto de estudio (4).

El presente trabajo aborda como objetivos principales: la evaluación del estado de deterioro de la estructura, así como el proceso de identificación del tipo de mortero utilizado para poder seleccionar los materiales de reparación compatibles a emplear. El elemento constructivo verificado es la espadaña de la iglesia del convento de Nuestra Señora de la Consolación en Alcalá de Henares.

Para abordar este estudio se ha implementado una metodología que incorpora técnicas no destructivas como el estudio de termografía infrarroja (5) y destructivas, como el análisis de las características del mortero de unión y de las piezas de fábrica originales empleadas.

### 1.1. Breve reseña histórica del edificio

El edificio primigenio data de 1593. Su iglesia, conocida como de Santa María Magdalena, fue construida hacia 1672. A la composición simétrica de la fachada de la iglesia se añade a un lado otro cuerpo, también de ladrillo y en su mismo plano. La prolongación en altura de la fachada de este cuerpo forma la espadaña (campanario

formado por un solo muro en el que se abren huecos donde se sitúan las campanas). La espadaña consta de dos cuerpos separados por cornisa, el inferior con dos huecos y el superior con uno rematado con friso triangular. Los huecos se hallan rematados por arcos de medio punto (6).

Durante la Guerra Civil el edificio resultó dañado como se desprende de un informe de 1944 de Patrimonio Artístico Nacional. Al parecer, estos daños no afectaron a la espadaña estudiada (Figura 1).

Existen documentadas intervenciones en 1962, además de otras obras de ampliación y reconstrucción durante la década de 1970. Con posterioridad, y según proyecto del arquitecto D. Manuel Babero Rebolledo, se realizaron importantes obras de restauración y adecuación culminadas en enero de 1988. Estas obras incluían, según consta en la Memoria del Proyecto, la "... restauración completa de la espadaña, picando revocos por la cara interior, sustitución de ladrillos en arcos, dinteles y sardineles, descarnado de llagas y llagueado, restauración de remate superior, etc."

Por último, aunque no se ha localizado documentación al respecto, se realizó otra intervención sobre la espadaña, siendo la característica más notable, la realización por la cara posterior de un revoco fingido emulando aparejo de ladrillo en el cuerpo superior de la misma.

## 2. METODOLOGÍA MULTIDISCIPLINAR APLICADA

### 2.1. Descripción de la metodología

En el presente trabajo se han acometido una serie de estudios previos que tienen su aplicación en la intervención sobre el patrimonio construido. Aunque existen metodologías expuestas en otras publicaciones, lo novedoso de la desarrollada es la versatilidad de elementos a estudiar y la incorporación de técnicas multidisciplinarias en el propio protocolo. El método se gestó y plasmó en una tesis doctoral (7) y se desarrolla mediante convenios públicos y privados para la materialización de varios ejemplos significativos. Se estudia el edificio con una vida, una historia y unos componentes constructivos, formales y tipológicos, que condicionan su estado actual y sus posibles usos futuros.

El análisis del estado actual del edificio, para la elaboración del informe correspondiente, se efectuará mediante un sistema de fichas descriptivas que nos ayuden a evaluar los daños y sintomatologías encontradas.



Este sistema pretende normalizar un proceso complejo y homogeneizar el manejo de la información tan dispar. Se dota por tanto de una uniformidad a la entrada de datos y a su posterior archivo y divulgación. Para la posterior interpretación tendríamos una herramienta de discretización y registro de la información de fácil manejo tanto "en papel" como informáticamente.

## 2.2. Aplicación de la metodología a la estructura en estudio

Con la documentación elaborada previamente en gabinete, se efectuaron dos jornadas de trabajo y medición, suficientes debido a la entidad de la muestra. Toda la toma de datos se complementó según la metodología descrita y en el formato estandarizado por la misma. A su vez, se extrajeron las muestras para su posterior ensayo en laboratorio.

Se elaboraron nueve fichas descriptivas, con un total de 36 páginas, que reflejan todos los datos obtenidos al respecto; y se acompañó de una memoria analítica y descriptiva del estado y las causas de los daños encontrados. Un ejemplo de la información presente en estas fichas se muestra en la Figura 2. A su vez, se incorporaron al documento, en sus anejos correspondientes, los resultados obtenidos del análisis de las muestras en el laboratorio. También se incorporó la documentación planimétrica básica, así como la información histórica que se estimó oportuna.

Entre los hallazgos encontrados cabe destacar que en la mampostería de fábrica de ladrillo, se observan piezas de diferentes medidas y composición provenientes de las distintas intervenciones de rehabilitación. Las cornisas y otros elementos decorativos han sido ejecutados con ladrillo aplanillado. El mortero de la fábrica parece de cal tradicional, típica de la época de construcción, con áridos de diferentes diámetros, aunque la naturaleza del mismo deberá comprobarse mediante una completa caracterización del mismo, dada la variedad de intervenciones que ha sufrido el elemento con el paso del tiempo. De hecho, parte de la cara interior del cuerpo superior de la espadaña ha sido revestida con un revoco cementoso fingido, emulando aparejo de ladrillo.

Existen gran cantidad de elementos de hierro anclados a la fábrica, como pates, las campanas, motorización de las mismas y restos de otras piezas sin identificar.

Se observaron las principales alteraciones y las fuertes diferencias en el grado de incidencia por zonas, siendo la más afectada

| FICHA DE SINTOMATOLOGÍA   |   | DESCRIPCIÓN   | CÓDIGO        |
|---|---|---|---------------|
| CATALOGACIÓN  | LOCALIZACIÓN  | Espadaña del Convento de las Agustinas. Consiste en una estructura mural de ladrillo cerámico, que sobresale verticalmente del resto de la edificación.             | PAT-03-a/2011 |
| Protección Integral   | Alcalá de Henares (Madrid)                                | OBSERVACIONES   | FECHA         |
| MONUMENTO, EDIFICIO, CONSTRUCCIÓN, LUGAR.   | Convento de Agustinas Descalzas de Santa María Magdalena. | Mal estado generalizado debido a la pérdida del mortero de agarre entre gran parte de los ladrillos, por a la presencia de agua e importante desplome del conjunto. | 18/03/2011    |
|   |   |   |               |
| ALZADO INTERIOR E: 1/75   |   | PLANTA E: 1/100   |               |
| 071-072-073. Vista general. Disgregación localizada del ladrillo y humedades.               |   | DESCRIPCIÓN FOTOGRAFÍAS   |               |
| 075-077. Vista general perfil espadaña. Se observa un claro desplome vertical del elemento. |   |   |               |

2

el cuerpo superior Figura 3, y en este, la cara exterior. Tanto la cara interior de este cuerpo y el cuerpo inferior en general evidencian un mejor estado de conservación por la menor incidencia de los factores de deterioro y por haber sido objeto de diversos trabajos de conservación y restauración. No obstante se observa fisuración en todos los arcos del elemento así como disgregación del mortero, pérdida de materiales así como un ligero desplome de todo el conjunto hacia el interior. Por todo ello, se está planteando una nueva intervención en el elemento.

## 3. TÉCNICAS EXPERIMENTALES APLICADAS AL ESTUDIO

Para una evaluación completa de todas los daños existentes en el elemento se procedió a realizar, de manera complementaria al análisis visual, mostrado en el esquema de la Figura 4, un estudio no destructivo mediante termografía infrarroja de los elementos dañados (8) (9) (10) (11). El estudio termográfico se llevó a cabo con una cámara modelo FLIR B335 con una calidad de imagen térmica de 320x240 píxeles y una sensibilidad térmica inferior a 50 mK, con un rango de temperatura entre -20 y +120 °C. Utiliza como detector de radiación infrarroja para longitudes de onda entre 8-13 µm un microbolómetro que no requiere refrigeración. Los puntos estudiados con esta técnica se presentan en el esquema anteriormente citado.

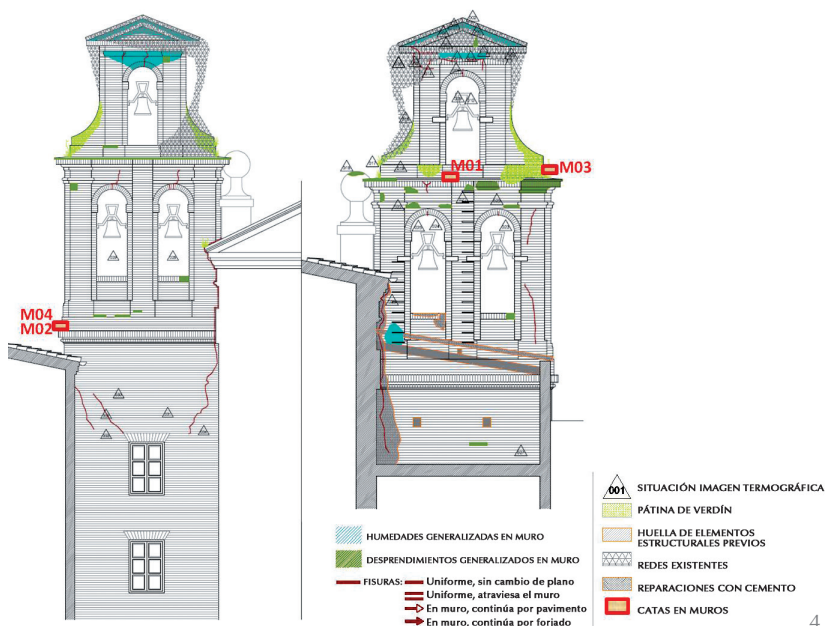
2. Ficha de sintomatología correspondiente a la localización de daños detectados.

3. Estado actual de la Espadaña. Desplome claro del cuerpo superior de campanas y estado de disgregación del mortero de la fábrica.



3





4. Levantamiento de daños en la estructura y localización de los termogramas y las catas realizadas.

5. Muestras extraídas de la fábrica de ladrillo original. En la M4 se obtuvieron restos del mortero original.

Además se extrajeron cuatro muestras de diferentes zonas afectadas en la espadaña del convento para realizar un estudio completo de las características del mortero de unión y las piezas de fábrica, siguiendo las indicaciones dadas en la recomendación Rilem (12) (13) y otras indicaciones dadas por diferentes autores al respecto (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21). El análisis químico elemental así como el uso de técnicas complementarias de análisis como porosimetría de intrusión de mercurio (MIP), difracción de rayos X (RDX), microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis termogravimétrico diferencial (ATD) y la caracterización mecánica de los materiales permitirá ahondar en las características del mortero de unión y las piezas de fábrica originales empleadas; evaluando de manera completa el estado de deterioro actual y facilitando la elección de los nuevos materiales a emplear en la rehabilitación.

En cuanto a la caracterización mecánica de las piezas de fábrica (22) Figura 5, se tallaron muestras cúbicas de aproximadamente 4 cm de lado para realizar ensayos de compresión simple de las fábricas extraídas del edificio según la norma UNE-EN 772-1. De las muestras M2 y M3 se intentaron tallar cuatro probetas cúbicas de cada una, pero solo se pudieron conseguir con formas y dimensiones correctas 2 de la M2 y 4 de la M3. Para dichos ensayos de rotura se utilizó una prensa de rotura a compresión de morteros.

Se realizaron además ensayos de *pull off*. Dicho ensayo tiene como objetivo el evaluar la adherencia entre capas. Una de las normas que se sigue es la ASTM C 1583-04. El procedimiento es taladrar con una corona de 50 cm de diámetro un testigo sobre la

capa de arriba y penetrar hasta unos mm de la superficie de contacto con la otra capa. Una vez taladrado se pega un disco sobre este testigo y a continuación un segundo disco metálico y una pieza circular se unen a través de un tornillo a este disco adherido al testigo. Esta última pieza es la que encaja en el equipo de *pull off*. Posteriormente se hace girar el equipo con un movimiento circular lento y progresivo hasta producirse el arrancamiento de la probeta con despegue o ruptura de alguna de las distintas partes del sistema.

En el caso que nos ocupa no se ha podido profundizar nada sobre la muestra ya que al iniciar el taladro, se produjo la rotura del elemento por la unión entre el mortero y la fábrica. De ahí que la valoración de la adherencia es prácticamente nula.

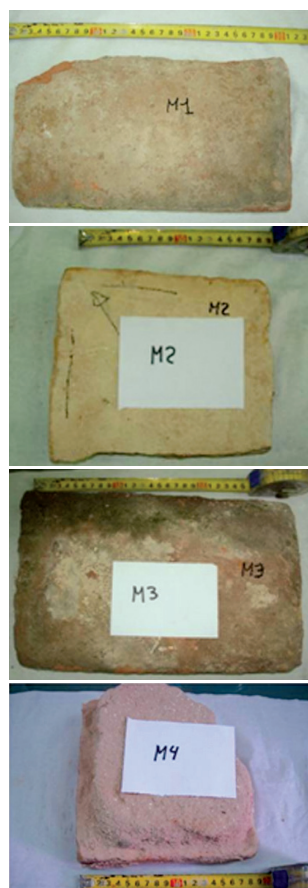
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Estudio termográfico

De forma previa al análisis termográfico del elemento se procedió a la determinación experimental de las emisividades de los diferentes materiales inspeccionados. Para ello, se extrajo una muestra de mortero adherido al elemento de fábrica de la muestra numerada como M4 y se determinó la emisividad real de ambos materiales (ISO 18.434-1) obteniéndose valores experimentales de 0,71 para el mortero y 0,93 para el ladrillo. El posterior tratamiento de las imágenes térmicas se realizó considerando, de manera general, como parámetros de objeto  $d=0,5m$ ,  $HR=35\%$  y  $T_{ref}=20\text{ }^{\circ}C$ .

La evaluación mediante captación de imágenes termográficas se realizó a primera hora de la mañana, antes de que la radiación solar incidiera sobre el elemento produciendo el calentamiento generalizado de toda la estructura. Se realizaron un total de 34 termogramas localizados en el alzado interior del elemento. En estos termogramas ha sido posible analizar detalles concretos de defectos o patologías encontradas en la estructura. Si bien algunas de ellas ya eran intuitas en la inspección visual, en muchas ocasiones no es así, y el estudio termográfico ha resultado esencial para confirmar dichas patologías o defectos.

Un ejemplo evidente se muestra en la Figura 6. Las fotografías corresponden al alero del cuerpo superior de la espadaña. La inspección en este punto se realizó desde una distancia aproximada de 2 m, dado que la disposición del andamiaje en esta zona impedía una aproximación mayor. Mediante análisis visual, previo al termográfico, no fue posible determinar presencia de



humedad en la zona, sin embargo, se evidencian claramente en la imagen termográfica zonas de inferior temperatura que corresponden al efecto de enfriamiento local por evaporación de agua.

Esta es una de las principales ventajas de esta técnica no destructiva. Hace posible la detección de patologías o defectos incluso en zonas de difícil accesibilidad, sin necesidad de una aproximación física a la zona en estudio.

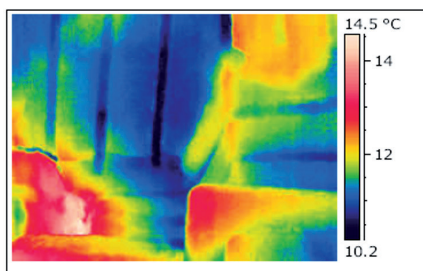
En el caso de pérdida de adherencia y fisuración, el defecto se visualiza de forma evidente en la Figura 7, ya que se detectan en los dos casos grandes diferencias de temperatura a ambos lados de la fisura dado que la transmisión de calor en estas zonas no puede producirse por conducción debido a la discontinuidad del material. En esta imagen también se detectan morteros de diferente naturaleza al original, empleados en diversas zonas de la espadaña y fácilmente reconocibles mediante termografía infrarroja.

#### 4.2. Análisis de los materiales

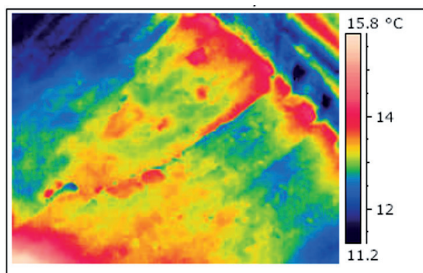
Por la composición química se descarta que pueda tratarse de un mortero de yeso, dada la escasa presencia de  $\text{SO}_3$  en la muestra. Los morteros hidráulicos de cal presentan en general menores porcentajes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que los de cemento, ya que suelen tener menor proporción de  $\text{C}_3\text{A}$  y  $\text{C}_4\text{AF}$ , aunque de los resultados obtenidos en este análisis químico fundamental resulta complejo discernir entre una tipología u otra de mortero.

Es importante el cálculo del Índice de Cementación (CI) desarrollado por Boyton que estima la hidraulicidad del mortero. Es necesario realizar un ataque ácido a la muestra previo al análisis. De este modo también será posible determinar la proporción de árido silíceo insoluble en ácido presente en la muestra y así calcular la relación árido/aglutinante. El % de residuo sólido seco insoluble tras el ataque ácido ( $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$  1/1 en caliente) es del 76,4%, lo que supone, por lo dicho hasta el momento, una cantidad de árido silíceo en la muestra de aproximadamente este porcentaje, y un CI de 0,26, correspondiente a una cal débilmente hidráulica.

Se han realizado por duplicado, ensayos de porosimetría de intrusión de mercurio, sobre las muestras de mortero. Los morteros presentan una porosidad muy elevada, de alrededor del 36% en volumen, con una densidad de alrededor de 1,6 gr/ml. Cabe destacar que las muestras presentan un patrón de poros basado en 2 máximos, el principal,



6



7

centrado alrededor de 70  $\mu\text{m}$  y el menor, en torno a 2  $\mu\text{m}$ , diámetros, en principio muy elevados para un mortero de cemento.

El análisis cualitativo de los espectros obtenidos tras realizar los análisis de DRX a dos muestras de mortero, mediante atribución de los distintos picos a las correspondientes fases cristalinas indican que mayoritariamente, los morteros presentan en su composición las siguientes fases cristalinas: de forma mayoritaria, Cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), y de forma minoritaria diversos feldespatos (especialmente Albita y Microclina), alguna mica Dolomita y Gehlenita.

La aparición de Gehlenita es un indicador utilizado por diversos autores (15) para la detección de presencia de un mortero de cal, dado que ésta es una fase estable formada a temperatura inferior a 1200 °C que sólo se da en morteros de cal hidráulicos, los cuales se obtienen por tratamiento de piedra caliza e impurezas arcillosas aproximadamente a esta temperatura. En el caso de los morteros de cemento, aunque los materiales de partida son prácticamente idénticos, dicha fase no se presencia dada la superior temperatura (1400 °C) utilizada para la fabricación del clínker. La presencia mayoritaria de calcita con ausencia del resto de fases antes mencionada hace pensar en una carbonatación prácticamente total de todas las fases alcalinas, encontrándose de forma mayoritaria calcita y sílice, siendo éstas las fases estables de los productos de carbonatación. Cabría además encontrar presencia minoritaria de yeso e hidróxido de aluminio, no detectados mediante esta técnica.

Por todo ello, habiéndose descartado que se trate de un mortero de yeso, se empieza a perfilar como un mortero de cal, más que de cemento ya carbonatado.



6. Termograma: Alzado interior. Alero izquierdo cuerpo superior de la espadaña. Se observa Fisuración y humedades en ladrillo y mortero.

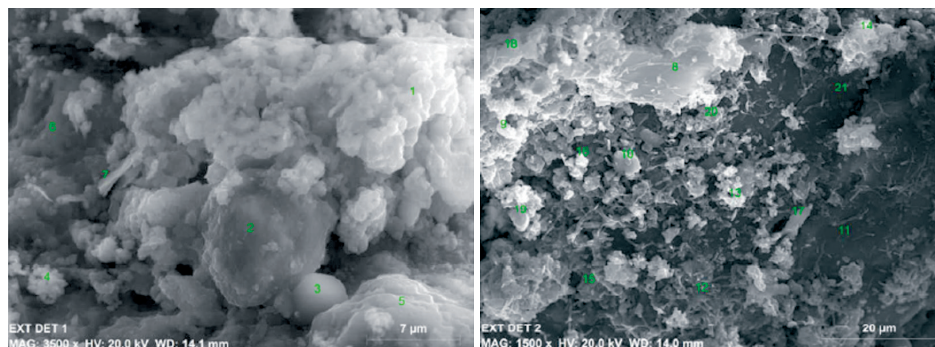


7. Termograma: Alzado interior. Arco izquierdo del cuerpo inferior de la espadaña. Se observa Fisuración en el arco, Se detecta una variación de temperaturas a ambos lados de la fisura. Se observa además en la parte izquierda de la termografía un cambio hacia temperaturas más frías por un aumento de la humedad en esta zona que coincide visualmente con una zona aparentemente reparada con un mortero de diferentes características que el original.



8. Imágenes obtenidas de la pasta de mortero mediante SEM (muestra exterior deteriorada, imágenes 1 y 2).

9. Datos normalizados a la cantidad de muestra perdida por calentamiento.



8

En cuanto a la microscopía electrónica de barrido, en la Figura 8 se presentan a modo de ejemplo algunas de las fotografías tomadas de una de las muestras analizadas (correspondiente a la parte externa del mortero, expuesta al ambiente). En ella se indican los puntos en los que se realizaron microanálisis de los componentes de la muestra mediante EDX.

No se va a entrar en detalle en el estudio exhaustivo de los resultados extraídos por esta técnica, pero si es de gran utilidad para el objeto del presente artículo el estudio realizado para la determinación de las relaciones Al/Ca y Si/Ca que permitan determinar la presencia o ausencia de gel CSH en la muestra, dado que su presencia sería indicativo claro de que se trata de un mortero de cemento. Queda constatado que en ninguno de los 149 puntos analizados a lo largo de las muestras se encuentran las proporciones Al/Ca y Si/Ca indicativas de la presencia del citado gel CSH, por lo que de nuevo se evidencia que debe tratarse de un mortero de cal, y no de cemento.

Los resultados de ATD y TG indican que en la muestra inicialmente se pierde el agua libre, posteriormente el agua combinada hasta llegar al desprendimiento de  $\text{CO}_2$  correspondiente a la Calcita, que supone la pérdida mayoritaria. Moropoulou, en (20) presenta el ratio  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  (agua hidráulica), que representa el inverso de la hidráulica de la muestra, frente al  $\text{CO}_2$  (pérdida de peso en %) extraídos de los resultados del ATD, considerando que permite discernir entre diferentes tipologías de morteros (20) (14). Los resultados de la muestra en estudio se han tratado junto con los expresados en (20) y normalizados a la cantidad de *binder* presente en la muestra (Figura 9). Se aprecia que las muestras en estudio se encuentran alejadas de los valores típicos de morteros en base cemento, siendo los dos puntos más próximos al dado por la muestra en estudio los correspondientes a morteros también de cal realizados según la tecnología *hot lime*.

#### 4.3. Ensayos mecánicos

Se pretende con estos ensayos determinar la capacidad portante de la estructura, determinando la resistencia a compresión de los elementos de fábrica así como la adherencia del mortero con estos últimos. Los resultados y dimensiones de las probetas de fábrica sometidas a rotura son las siguientes (Tabla 1).

La evaluación de la resistencia a compresión de la fábrica se puede hacer en base a varios criterios.

- Se puede hacer una valoración de descartar los valores de roturas anómalas y obtener el valor medio y su desviación. El resultado sería de una resistencia media de 5,93 MPa y una desviación de 1,53 MPa.
- Se puede hacer una valoración de descartar los valores de roturas anómalas y los valores extremos, y obtener el valor medio y su desviación. El resultado sería de una resistencia media de 5,30 MPa y una desviación de 0,14 MPa.

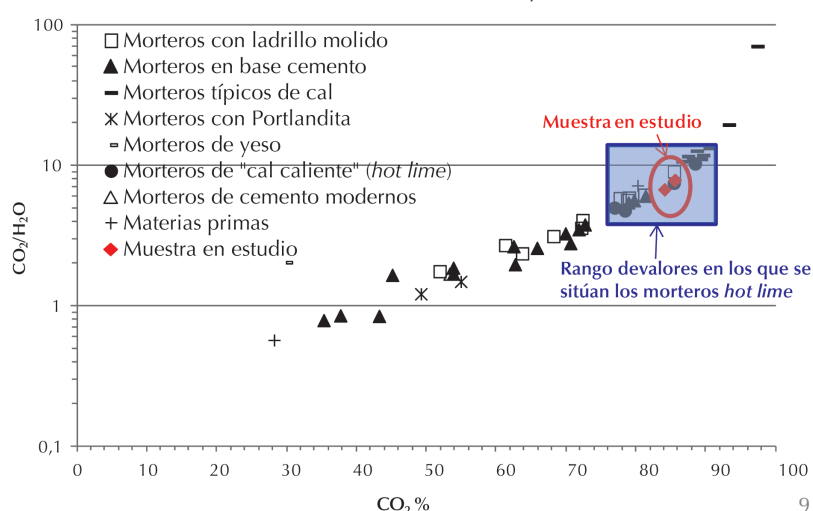


Tabla 1. Cuadro resumen de resultados de ensayos mecánicos.

| Probeta | Dimensiones (cm) | Resistencia (MPa) | Observaciones  |
|---------|------------------|-------------------|----------------|
| M2-a    | 3,77x4,09x3,77   | 3,5               | Rotura anómala |
| M2-b    | 4,16x3,97x3,78   | 8,2               |                |
| M3-a    | 4,35x4,58x4,26   | 4,9               |                |
| M3-b    | 4,58x3,94x4,24   | 5,4               |                |
| M3-c    | 4,51x4,55x4,16   | 5,2               |                |
| M3-d    | 3,95x4,38x4,24   | 3,4               | Rotura anómala |

- Se puede valorar siendo muy del lado de la seguridad y coger el menor valor, descartando las roturas anómalas. En este caso el valor de resistencia a compresión sería de 4,9 MPa.

Aun considerando el valor más favorable de cerca de 6 MPa, los valores de resistencia son bajos para materiales de fábrica.

En cuanto a la adherencia, como ya se adelantó en la parte experimental, ésta se puede considerar prácticamente nula, lo que acarrea problemas de estabilidad estructural.

La escasa adherencia lo que provoca, en una estructura de fábrica de ladrillo, es la falta de traba de los distintos componentes del elemento constructivo. Esto hace que se varíe su comportamiento mecánico, sobre todo en lo referido a acciones horizontales. Aunque también se penalizan sus características resistentes a compresión simple como elementos estructural.

## 5. CONCLUSIONES

El conocimiento, cada vez más preciso, de todos los parámetros que rodean la construcción y el estado de una edificación es fundamental para su caracterización. No hay que obviar en el estudio la azarosa vida por las que pasan las edificaciones históricas, pero es un parámetro que contemplamos en la metodología expuesta en el presente trabajo.

Uno de los puntales en los que se basa la metodología propuesta es el manejo y control de las disciplinas y técnicas a nuestra disposición en estos momentos, las cuales nos permitirán obtener los mejores resultados posibles en cada caso. Insistimos en el carácter multidisciplinar del procedimiento.

Las conclusiones extraídas de los estudios realizados en el presente artículo son las siguientes:

- La elaboración de un sistema para el análisis del estado actual del edificio ha de sistematizar un proceso complejo y homogeneizar el manejo de referencias de naturaleza dispar.
- El uso de termografía infrarroja como NDT complementaria a la inspección visual, aporta información precisa y fiable para el levantamiento de daños en este

tipo de estructuras, mostrando defectos ocultos dentro del campo visible. Esta herramienta debe ser utilizada con cautela, y conociendo los fundamentos de la misma ya que la interpretación de los termogramas se basa en la detección de la radiación infrarroja. No debe olvidarse que para una correcta cuantificación de la temperatura de cada material es necesario conocer el valor de la emisividad del mismo. Aunque en el presente trabajo se ha determinado experimentalmente el valor de emisividad de los materiales estudiados, de forma general es complicado realizar estas determinaciones, por lo que esta técnica termográfica se utiliza de manera cualitativa. Las diferencias de radiación o temperatura detectados se asocian a cambios de naturaleza o propiedades del material, de ahí que sea posible la localización de defectos como humedades o fisuras siempre y cuando las condiciones térmicas del elemento en estudio sean apropiados. Por ello es también importante mencionar que el momento del día en el que se realiza el estudio termográfico es un factor determinante para la detección de estos defectos. Debe buscarse el mayor contraste térmico en los materiales que poseen diferentes inercias térmicas.

- Es complejo establecer mediante termografía una relación entre las humedades detectadas, cuyas causas son ajenas al material, dado que se trata de un elemento expuesto a la intemperie, y la fisuración de los materiales. Si bien la termografía evidencia la presencia de fisuras en las zonas húmedas, la causa de la fisuración puede deberse también a otros factores. Deben utilizarse otras técnicas complementarias, incluyendo el estudio mecánico de la estructura, que permitan definir la causa de las patologías detectadas.
- A partir de la aplicación de las técnicas experimentales descritas, ha sido posible discriminar entre diferentes posibles tipologías de mortero utilizadas en la época de construcción de la estructura, siendo posible concluir que se trata de un mortero de cal, descartándose por completo la posibilidad de tratarse de un mortero de yeso o cemento. Dentro de los diferentes tipos de mortero de cal típicos de la época de construcción de la espadaña, se ha podido determinar que muy probablemente se trata de la tipología denominada como *hot lime*, producida de forma artesanal *in situ*.

## REFERENCIAS

- (1) VV.AA. (2007). *Actuaciones y Rehabilitación en Construcciones históricas singulares*. Edita: 7.ª Jornada Técnica SEMSIG-AETESS.

- (2) Martínez, E., Macías, V. (2011). Actuaciones previas a la intervención en edificios históricos: dos ejemplos prácticos "Las Covachuelas" (Alcázar de Toledo) y Ayuntamiento del Cortijo de San Isidro (Aranjuez). *Informes de la Construcción*, 63(522): 21-34. doi:10.3989/ic.10.031.
- (3) Lacuesta, R. (1993). Estudios previos para la restauración de la azotea de la casa Milá de Barcelona (Cataluña, España). *Informes de la Construcción*, 45(428): 9-18. doi:10.3989/ic.1993.v45.i428.1161.
- (4) Serrano, F. (2007). *Estudio Integral de los edificios: La lógica de su procedimiento*. Edita: COAATM-Fundación Escuela de la Edificación.
- (5) Rodríguez, C., Morales, M. J., Rubio de Hita, P., Pérez Gálvez, F. (2011). Inspección mediante técnicas no destructivas de un edificio histórico: oratorio San Felipe Neri (Cádiz). *Informes de la Construcción*. 63(521): 13-22. doi:10.3989/ic.10.032.
- (6) Román, C. (1994). *Arquitectura conventual de Alcalá de Henares*. Institución de Estudios Complutenses (CSIC).
- (7) Martínez, E. (2010). Metodología y disciplinas previas para los estudios en Edificaciones Históricas. Su influencia en el Proyecto de Intervención (Tesis doctoral). Madrid: Universidad San Pablo CEU.
- (8) Avdelidis, N. P., Moropoulou, A. (2004). Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage*, 5(1): 119-127. doi: 10.1016/j.culher.2003.07.002.
- (9) Kandemir-Yucel, A., Tavukcuoglu, A., Caner-Saltik, E. N. (2007). In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity. *Infrared Physics & Technology*, 49(3): 243-248. doi: 10.1016/j.infrared.2006.06.012.
- (10) Moropoulou, A., Avdelidis, N. P., Kouli, M., Kanellopoulos, N. K. (2000). Nondestructive Methods for Materials Characterization. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 591: 169-174. eds G. Y. Baaklini, N. Meyendorf, T. E. Matikas, & R. S. Gilmore.
- (11) Moropoulou, A., Kouli, M., Avdelidis, N. P. (2000). Infrared thermography as an NDT tool in the evaluation of materials and techniques for the protection of historic monuments. *Insight*, 42(6): 379-383.
- (12) Groot, C. et al. (2009). Rilem TC 203-RHM: Repair mortars for historic masonry. Testing of hardened mortars, a process of questioning and interpreting. *Materials and Structures*, 42(7): 853-865. doi: 10.1617/s11527-008-9455-x.
- (13) Lindqvist, J. E., Sandstrom, M., Rilem: RILEM TC 167-COM. (2000). Characterization of old mortars - Quantitative analysis of historical mortars using optical microscopy. *Materials and Structures*, 33(234): 612-617. doi: 10.1007/bf02480600.
- (14) Bakolas, A., Biscontin, G., Moropoulou, A., Zendri, E. (1998). Characterization of structural byzantine mortars by thermogravimetric analysis. *Thermochemica Acta*, 321(1-2): 151-160. doi: 10.1016/s0040-6031(98)00454-7.
- (15) Callebaut, K., Elsen, J., Van Balen, K., Viaene, W. (2001). Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium) - Natural hydraulic lime or cement?. *Cement and Concrete Research*, 31(3): 397-403. doi: 10.1016/s0008-8846(00)00499-3.
- (16) Elsen, J. (2006). Microscopy of historic mortars - a review. *Cement and Concrete Research*, 36(8): 1416-1424. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.12.006.
- (17) Leslie, A. B., Hughes, J. J. (2002). Binder microstructure in lime mortars: implications for the interpretation of analysis results. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 35(3): 257-263. doi: 10.1144/1470-923601-27.
- (18) Middendorf, B., Hughes, J. J., Callebaut, K., Baronio, G., Papayianni, I. (2005). Investigative methods for the characterization of historic mortars - Part 1: Mineralogical characterization. *Materials and Structures*, 38(282): 761-769. doi: 10.1007/bf02479289.
- (19) Middendorf, B., Hughes, J. J., Callebaut, K., Baronio, G., Papayianni, I. (2005). Investigative methods for the characterization of historic mortars - Part 2: Chemical characterization. *Materials and Structures*, 38(282): 771-780. doi: 10.1007/bf02479290.
- (20) Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K. (1995). Characterization of ancient, Byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques. *Thermochemica Acta*, 269: 779-795. doi: 10.1016/0040-6031(95)02571-5.
- (21) Schueremans, L., Cizer, O., Janssens, E., Serre, G., Van Balen, K. (2011). Characterization of repair mortars for the assessment of their compatibility in restoration projects: Research and practice. *Construction and Building Materials*, 25(12): 4338-4350. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.01.008.
- (22) Varum, H., Figueiredo, A., Silveira, D., Martins, T., Costa, A. (2011). Investigaciones realizadas en la Universidad de Aveiro sobre caracterización mecánica de las construcciones existentes en adobe en Portugal y propuestas de rehabilitación y refuerzo. Resultados alcanzados. *Informes de la Construcción*, 63(523): 127-142. doi:10.3989/ic.10.016

\* \* \*